http://pmse.scu.edu.cn

玻纤质量分数对长玻纤增强聚丙烯水驱动弹头辅助注塑管件的影响

匡唐清[1]，俸三喆[1]，朱瑶瑶[1]，柳和生[1]，杨 帆[2]
（1. 华东交通大学 机电与车辆工程学院，江西 南昌 330013；2. 华东交通大学 基础实验与工程实践中心，江西 南昌 330013）

摘要：分别以玻纤质量分数10%，20%，30%和40%的长玻纤增强聚丙烯（LGFRPP）材料制取一系列水驱动弹头辅助注塑（W-PAIM）管件。探究了玻纤质量分数对玻纤断裂长度、纤维取向、壁厚以及耐压性的影响。结果表明，随着玻纤质量分数的增加，玻纤断裂长度在较长区间内占比降低；不同玻纤质量分数的W-PAIM制件在壁厚层的取向不同，水道层的玻纤沿流动方向取向较模壁层和中间层更好，当玻纤质量分数为10%与40%时，水道层玻纤取向度最好，玻纤质量分数为20%时，中间层取向最差，玻纤质量分数为30%时，模壁层的玻纤取向较好；随着玻纤质量分数的增加，W-PAIM管件壁厚呈先增加后减小再增加的趋势；随着玻纤质量分数的增加，管件的耐压性先增加后减小最后又增加，当玻纤质量分数为20%时，耐压性最好。

关键词：长玻纤增强聚丙烯；水驱动弹头辅助注塑；玻纤质量分数；玻纤长度；纤维取向；壁厚；耐压性
中图分类号：TQ320.66+2 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-7555(2024)03-0087-11

长玻纤增强聚丙烯（Long glass fiber reinforced polypropylene，LGFRPP）是以纯聚丙烯（PP）为基体，加入一定量的玻纤和其他助剂而制成的一种高分子复合材料[1]。与短玻纤增强聚丙烯材料相比，长玻纤增强聚丙烯具有更优越的性能，比如：缺口冲击性能好，强度高、尺寸稳定性好、质量轻等[2~4]。使其在汽车、家电、建筑等领域有着广阔的应用前景[5]。目前，国内外有许多学者对LGFRPP复合材料在注塑方面的应用展开了研究。在实验方面，Rohde等[6]通过实验的方式探究了工艺参数对长玻纤增强聚丙烯冲击性能的影响，结果表明，高温裂解导致纤维脆化，其拉伸强度随之下降，同时研究发现背压压力对冲击性能和纤维长度有强烈负面影响。Wang等[7]通过实验探究了剪切对LGFRPP复合材料的纤维取向、纤维断裂的影响，发现对于纤维含量较高的制品，其沿着流动方向有更高的拉伸性能，发现纤维断裂会导致拉伸强度降低，纤维平均长度决定了LGFRPP制件的拉伸强度。You等[8]探究了纤维含量对PVC/PP复合材料的性能影响，发现随着长玻璃纤维（Long glass fiber，LGF）的提高，复合材料的储能模量增加，随着质量分数的增加，复合材料的力学性能均匀单调变化。在数值模拟方面，熊爱华等[9]利用3D模拟技术对长玻纤增强聚丙烯复合材料的注塑过程进行模拟，结果表明，试样中纤维取向呈明显的表层-芯层-表层的结构，且表层的纤维取向程度好于芯层。Foss等[10]提出了一种可以准确预测纤维取向的iARD-RPP模型，预测结果显示了其具有5层（皮-壳-芯-壳-皮）的结构。Tseng等[11]通过实验与模拟的手段探究了低碳纤维热塑性复合材料的纤维取向和力学性能，发现纤维含量对纤维取向分布影响明显，通过模拟发现，黏度对玻纤的取向分布会产生影响。

流体驱动弹头辅助注塑技术（Fluid-projectile-

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0053
收稿日期：2023-05-27
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52163006，52273033）；江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目（20223BBE51012）；江西省自然科学基金重点项目（20232ACB204004）
通讯联系人：柳和生，主要从事聚合物成型工艺研究，E-mail: hsliu@ecjtu.edu.cn

assisted injection molding，F-PAIM）是在水辅助注塑技术（Water-assisted injection molding，WAIM）基础上发展变化而来的，根据穿透介质的不同，可将F-PAIM分为2类——水驱动弹头辅助注塑技术（Water projectile- assisted injection molding，W-PAIM）和气体驱动弹头辅助注塑技术（Gas projectile- assisted injection molding，G- PAIM）。F-PAIM最早是在一项专利中提出的[12]，但是直到2006年宝马公司才成功地将此技术应用于旗下宝马3系列车型的冷却管道[13]。目前，除德国亚琛大学IKV研究所外[14,15]，国内只有本课题组[16~19]和周华课题组[20,21]一直致力于W-PAIM的研究。W-PAIM弥补了WAIM材料适用性少，材料往往需要改性处理的缺点，又有壁厚更薄、内壁面更光滑、冷却速率更快的优点[16]，其工艺过程是利用高压水驱动模具型腔喷嘴处的弹头穿透熔体，后续高压水再对其保压和冷却，最终得到中空塑件。

玻纤质量分数会影响到LGFRPP的流变性能，进而影响到制品的壁厚以及微观性能。因此，本文通过实验的方式，针对长玻纤增强聚丙烯复合材料W-PAIM直管件，研究玻纤质量分数对玻纤断裂长度、纤维取向、壁厚和耐压性能的影响。进而为LGFRPP材料在W-PAIM注塑成型技术中的应用提供理论指导与应用参考。

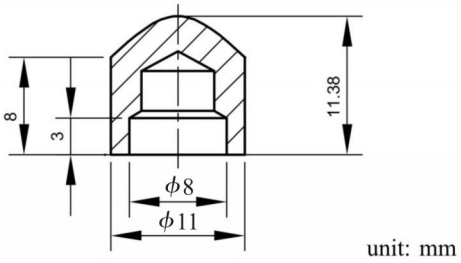


Fig. 1 Schematic diagram of the projectile structure

1 实验部分

1.1 主要原料

10%，20%，30%和40%的长玻纤增强聚丙烯复合材料：牌号分别为GB301HP，GB302HP，GB303HP和GB304HP，沙特沙伯基础公司。成型材料的相关物性参数如Tab.1所示，粒料初始长度约为12 mm。弹头材料为聚酰胺6（PA6），其熔点为215 ℃，维卡软化温度为210 ℃。

1.2 实验平台

注塑机：广东东华机械有限公司，型号为TTI-250FT；干燥机：深圳达安泰机械设备有限公司，型号为DATD12；模温机：深圳博瑞克机械有限公司，型

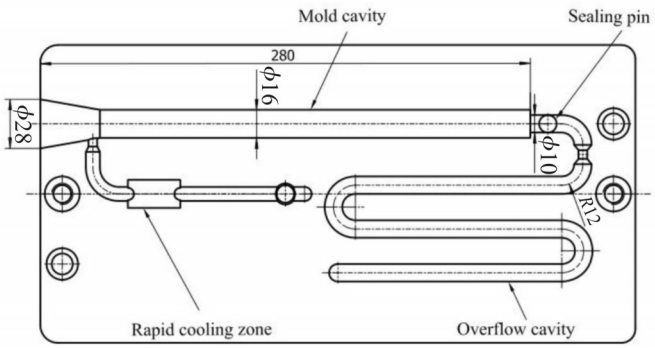


Fig. 2 Diagram of the mold structure

Tab. 1 Physical parameters related to molding materials

Material	Melt index /(g·10 min^{-1})	Thermal deformation temperature/℃	Molding shrinkage/%	Bending modulus /MPa	Tensile strength/MPa
10%LGFRPP	4	149	0.4~0.8	3790	95
20%LGFRPP	5	158	0.7~1	4550	109
30%LGFRPP	10	165	0.1~0.6	6600	105
40%LGFRPP	6	166	0.7~1	6760	121

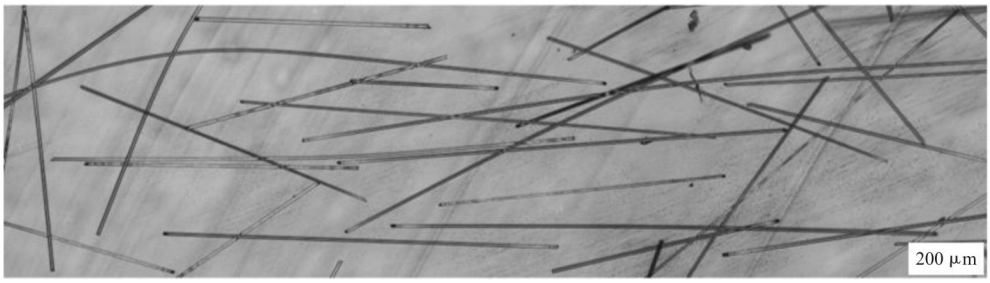


Fig. 3 Glass fiber length by optical microscope

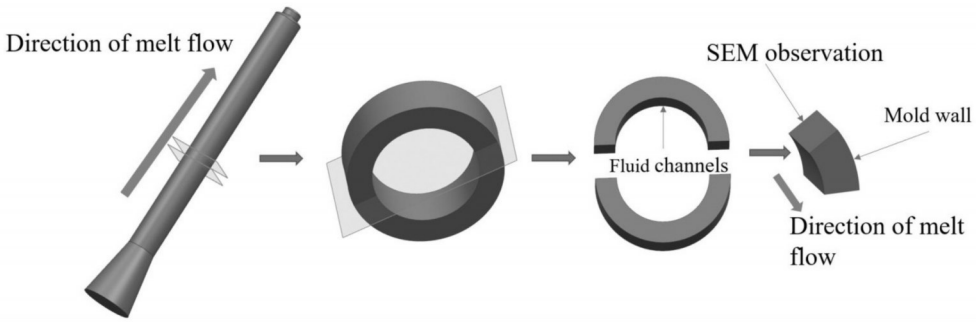


Fig. 4 Preparation method of SEM sample

号为BTM-09W;注水系统:包括高压水泵,注水组件包括注水阀体、水针;弹头:直径长11 mm,弹头结构如Fig.1所示;模具:圆直管型腔模仁,型腔直径为16 mm,长为280 mm,模具结构如Fig.2所示。

扫描电镜:荷兰FEI公司,型号为Nova Nano SEM 450;耐压测试机:型号为MTSH-6。

1.3　长玻纤增强W-PAIM管件成型

针对玻纤质量分数分别为10%,20%,30%和40%的LGFRPP复合材料采用溢流法制取W-PAIM直管件,工艺参数如Tab.2所示。

Tab. 2 Molding process parameters

Forming method	Overflow method
Melt temperature /℃	250
Water injection delay time /s	4
Melt injection pressure/MPa	8
Water injection pressure/MPa	8
Mold temperatur /℃	80
Holding time/s	10

1.4　测试与表征

1.4.1　*玻纤长度测试*:将所制管件截取小部分放入坩埚中,通过加热坩埚至600 ℃,燃烧2 h,去除基体PP后,再用水溶液进行溶解,用玻璃棒缓慢搅拌使溶液均匀分散,最后将水溶液放到载玻片上自然干燥得到样品。将制备好的样品置于5倍光学显微镜下,调节合适光强,在低倍下找到物相,并拍照取样,再使用Image-Pro Plus软件对所拍的照片进行长度测量,每组实验测量300根玻纤,结果如Fig.3所示。

1.4.2　*扫描电镜试样制备与分析*:在样品中间位置截取5 mm圆环,沿直径方向切1个小口,将其放入装有液氮的器皿中冷却20 min后取出;再沿小口处脆断,在断面处切下一小块后置于喷金仪中进行喷金处理,而后将其断面朝上并且放置在贴有导电胶的SEM载物台上,其制备方法如Fig.4所示。利用扫描电镜(SEM)对水驱动弹头辅助注塑管件的模壁层、中间层和水道层分别进行观测加速电压为50 V~30 kV,如Fig.5所示。

1.4.3　*壁厚测试*:为尽可能保证测量结果的准确性,4种玻纤质量分数时的管件均各取3根进行测量。其管件壁厚的测量方法为,沿熔体流动方向依次取4个截面(P1,P2,P3和P4),各个截面内沿管件径向方向测量4个位置壁厚(T1,T2,T3和T4),每个等距截面的壁厚平均值作为该组管件在该位置的壁厚值,每个位置(P1,P2,P3和P4)的壁厚平均值作为该根管件的壁厚平均值,再取3根管件的壁厚平均值作为

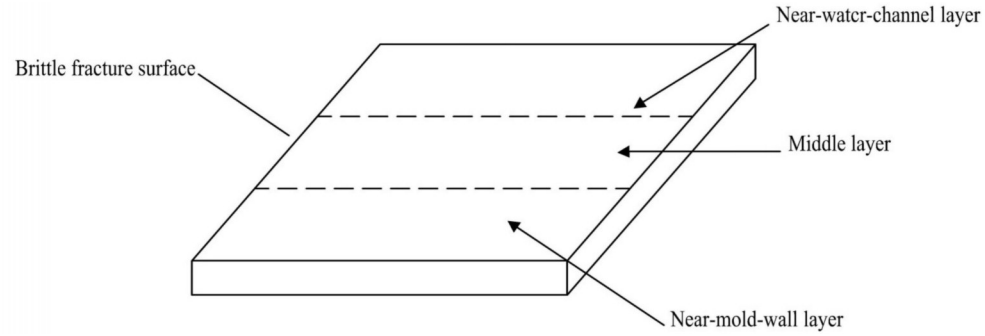


Fig. 5 Observation of SEM sample

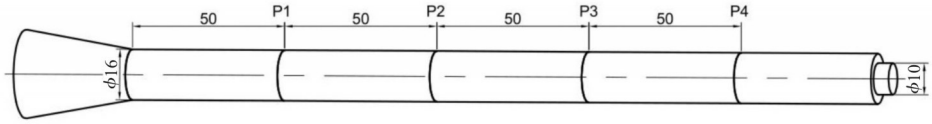


Fig. 6 Measurement solution of pipe wall thickness

该组管件的壁厚值。

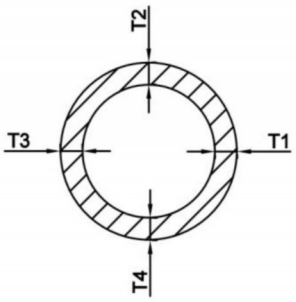


Fig. 7 Measurement position of pipe cross section

1.4.4 耐压测试：采用管材耐压测试机对管件进行耐压试验。测定其在恒定温度下瞬时爆破的最大压力值，考虑到管件的进出水口横截面积的不同会引起制件内径不均匀，因此截取试样中间150 mm长的管件作为测试对象，其测试样品如Fig.8所示。

2 结果与讨论

2.1 玻纤质量分数对W-PAIM管件玻纤断裂长度的影响

玻纤长度是决定LGFRPP力学性能的主要因素之一[22]。对玻纤含量10%~40%的长玻纤增强聚丙烯W-PAIM管件进行玻纤长度测试，其测量结果如Fig.9所示。

由Fig.9可看出，玻纤断裂长度分布在0.6~1.2 mm范围的居多，数量比均在40%以上，其中玻纤含量30%的该数量比达到57.4%；其次是分布在0.6 mm以下，除玻纤含量40%的占比达到35%以上，其他3种在20%上下。玻纤断裂长度分布在1.2~1.8 mm范围的占比较均匀，10%~40%玻纤含量的玻纤断裂长度数量比均在15%上下；玻纤断裂长度分布在2.4~3.0 mm范围的较少，数量比均在5%上下；而

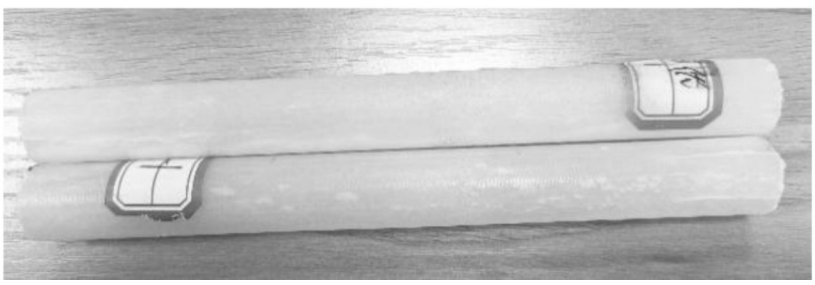


Fig. 8 Pipe fitting pressure resistance test sample

玻纤断裂长度分布在3.0~3.6mm范围的极少,数量比均在2%上下。由此可见,玻纤断裂长度在较短的玻纤长度区间占比更高,在较长的玻纤长度区间占比低,且随着玻纤质量分数的增加,玻纤断裂长度在较短区间占比越高,在较长区间占比越低。

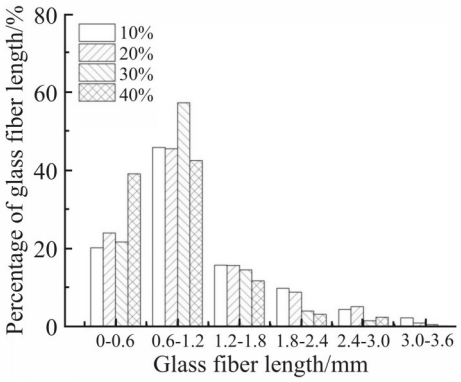


Fig. 9 Fracture length distribution of tubing glass fiber at different glass fiber mass fractions

当玻纤质量分数低时,玻纤在基体PP中的密度更小,分散更均匀,玻纤间的相互作用更弱,玻纤间因相互作用而断裂的玻纤数量少;当玻纤质量分数增加时,成型过程中玻纤间的相互作用更多更强烈,长度较长的玻纤更容易断裂,使得玻纤在长度较长区间内的断裂长度更大。

2.2 玻纤质量分数对W-PAIM管件玻纤取向的影响

对玻纤质量分数分别为10%,20%,30%和40%的LGFRPP复合材料W-PAIM制件在P2位置处进行取样,并对管件的模壁层、中间层和水道层进行SEM观测。

Fig.10(a)是玻纤质量分数为10%的LGFRPP管件的总壁厚SEM图像,Fig.10(b)~(d)分别为模壁层、中间层和水道层的局部放大SEM图。由Fig.10(a)可知,玻纤在整个壁厚层的分布密度较小,玻纤的保留长度总体较长;从Fig.10(b)可以看出模壁层的玻纤取向度较低且分布不均;从Fig.10(c)可以看出中间层的玻纤少数沿流动方向取向,一部分与流动方向成锐角;从Fig.10(d)可知水道层的玻纤大多数沿流动方向高度取向,极少部分玻纤与流动方向成锐角分布。

Fig.11(a)为玻纤质量分数为20%的LGFRPP管件的总壁厚SEM图,Fig.11(b)~(d)分别为模壁层、中间层和水道层的局部放大SEM图。与10%的LGFRPP复合材料W-PAIM管件SEM图对比可知,由Fig.11(b)可知,模壁层的玻纤取向度较低,大部分与流动方向呈夹角分布,存在部分因玻纤拔出而存在的小孔;中间层玻纤长度较长且分布杂乱无章,大部分垂直于流动方向或呈一定夹角;从Fig.11(d)可看出水道层的玻纤沿流动方向高度取向。

Fig.12(a)为玻纤质量分数为30%的LGFRPP管

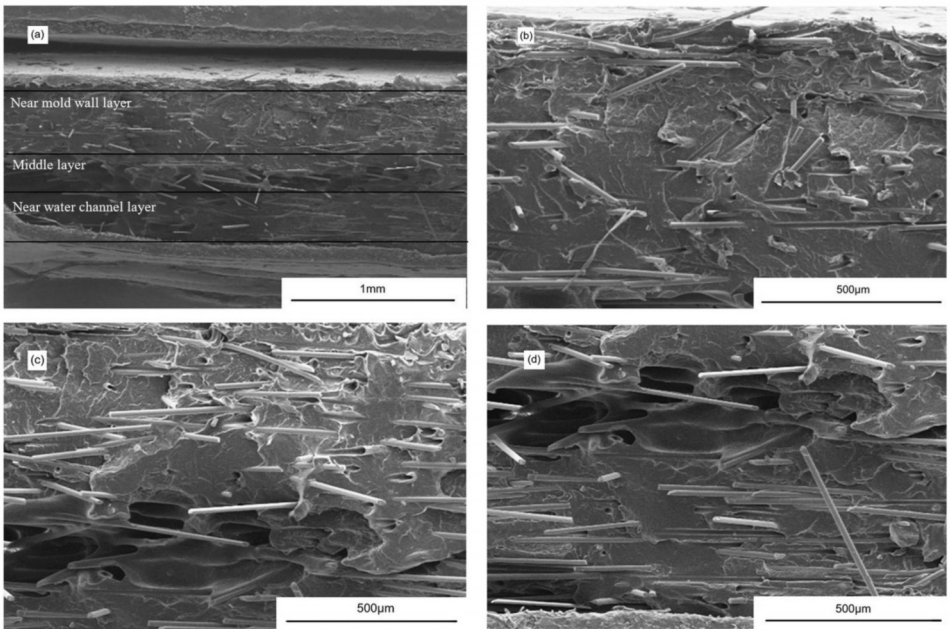


Fig. 10 SEM images of 10% LGFRPP composite W-PAIM pipe fittings
(a): total wall thickness layer; (b): molded wall layer; (c): intermediate layer; (d): channel layer

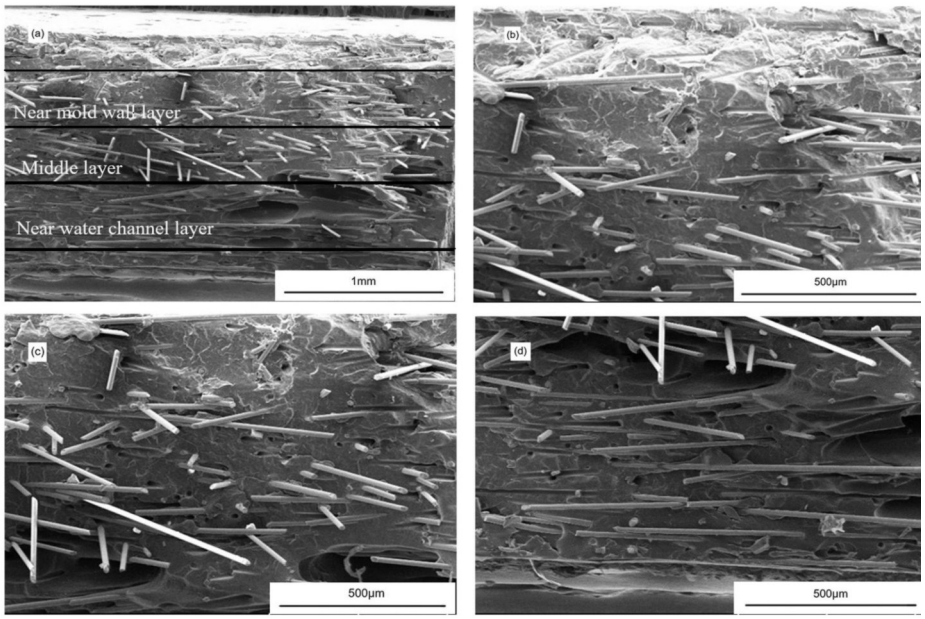


Fig. 11 SEM images of 20% LGFRPP composite W-PAIM pipe fittings
(a): total wall thickness layer; (b): molded wall layer; (c): intermediate layer; (d): channel layer

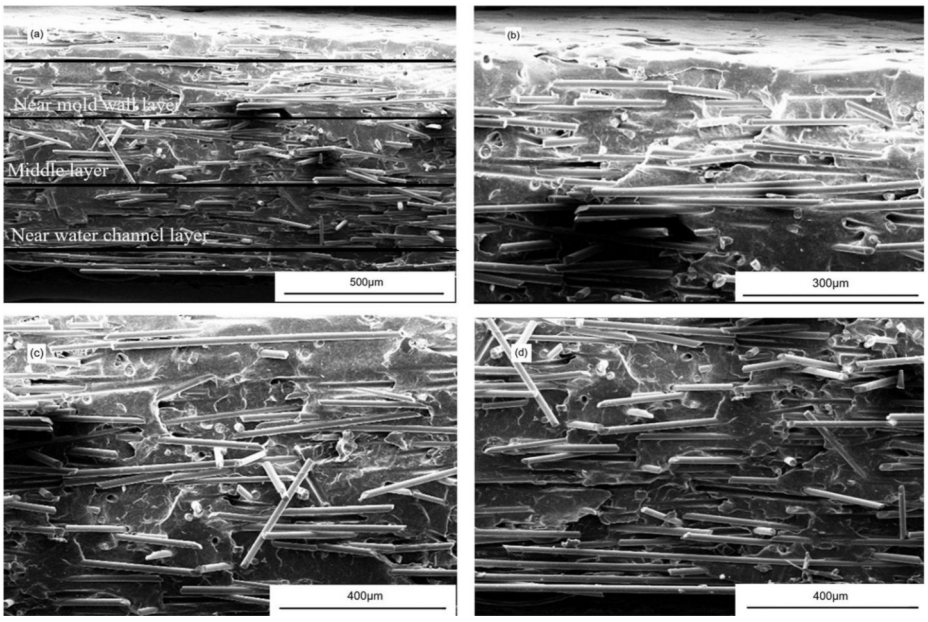


Fig. 12 SEM images of 30% LGFRPP composite W-PAIM pipe fittings
(a): total wall thickness layer;(b): molded wall layer; (c): intermediate layer; (d): channel layer

件的总壁厚SEM图像，从Fig.12(b)中可以看出，模壁层的玻纤取向较玻纤质量分数为20%的W-PAIM变好，大多数的玻纤沿流动方向取向；从Fig.12(c)可看出中间层的玻纤部分沿流动方向取向，部分玻纤与流动方向垂直或呈锐角；水道层玻纤分布更加紧密且水道层的玻纤沿流动方向高度取向。

Fig.13(a)为玻纤质量分数为40%的LGFRPP管件的总壁厚SEM图。从Fig.13(a)可看出，整个壁厚层的玻纤数量明显增多，密度增大；由Fig.13(b)可知，模壁层有少数断裂的玻纤随机分布，模壁层的玻纤大多数沿流动方向垂直分布，少数玻纤沿流动方向取向；Fig.13(c)可知中间层的玻纤取向度较低，少部分沿流动方向取向，有少数因玻纤拔出而存在的孔洞和断裂的短小玻纤随机分布，少部分垂直于流动方向；Fig.13(d)可观测出水道层的玻纤大多沿流动方向高度取向。

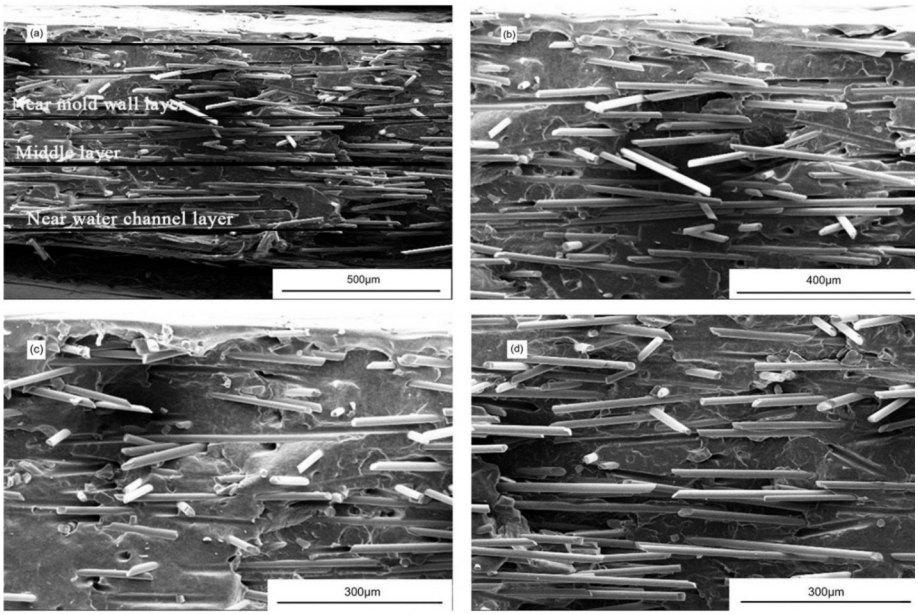


Fig. 13 SEM images of 40% LGFRPP composite W-PAIM pipe fittings
(a): total wall thickness layer; (b): molded wall layer; (c): intermediate layer; (d): channel layer

通过以上分析可知,不同玻纤质量分数的LGFRPP复合材料W-PAIM管件的壁厚层可分为3个区域,即模壁层、中间层和水道层。不同玻纤质量分数的管件在不同位置的取向存在差异,但它们之间都有共同点:水道层的玻纤取向较模壁层与中间层的取向更好。当玻纤质量分数由10%增加至40%时,水道层的玻纤沿流动方向取向程度逐渐变差,玻纤质量分数为20%时,中间层取向最差,玻纤质量分数为30%时,模壁层玻纤取向较好,LGFRPP复合材料W-PAIM管件的玻纤取向与玻纤质量分数、所处位置有关。

玻纤在不同层的取向差异是由弹头与熔体、模具壁面与熔体间的剪切运动导致的,模壁层的玻纤取向主要形成于熔体注射初始阶段与壁面之间的相互剪切,水道层的玻纤取向主要形成于高压水推动弹头穿透熔体阶段,而中间层的玻纤取向主要是在这2个阶段的共同影响下。

在熔体注射的初始阶段,熔体前端以喷泉流方式流动,中心还未形成取向的熔体被推动到模具壁面后迅速冷却冻结,其所受到的来自壁面的剪切力较小,导致其模壁层的取向度较低,由Fig.10(b)和Fig.11(b)可看出。根据已有的模拟结果可知[19],在弹头穿透过程中,熔体受到的剪切作用主要来自于弹头表面形成的凝固膜,另外弹头两侧产生的剪切速率更大,产生的剪切作用更强,当水道层玻纤初始位置与流动方向成锐角分布时,形成于弹头前端的柱塞流以及凝固膜的共同作用下所产生的剪切更利于水道层玻纤沿流动方向取向。同时,当玻纤质量分数低时,玻纤断裂弱,玻纤间的相互干扰程度低,在弹头穿透所带来的强剪切作用下,更加利于水道层沿流动方向取向,由Fig.10(d)和Fig.11(d)可知。而中间层因受到的剪切作用不明显,导致其玻纤随机分布,取向度也不高,当玻纤质量分数增加时,熔体间玻纤的相互干扰作用增强,玻纤间断裂严重,从而在熔体注塑与弹头穿透时所受到的阻力增大,使其不利于剪切取向,因而整个壁厚层较低质量分数的玻纤取向度更低,由Fig.11(c)和Fig.13(c)可见。

2.3　玻纤质量分数对W-PAIM管件壁厚的影响

测量不同玻纤质量分数的W-PAIM管件壁厚,其测量结果如Fig.14所示。由图可知,随着玻纤质量分数的增加,壁厚呈先增后减最后又增大趋势,在实验条件下,玻纤质量分数为20%,壁厚最大为1.121 mm,玻纤质量分数为30%,壁厚最小为0.857 mm。

W-PAIM管件的壁厚随着玻纤质量分数的增加呈先增后减再增趋势的原因是:玻纤质量分数由10%增加到20%时,熔体中玻纤黏度较低,熔体流动性还较好,由玻纤断裂长度测试结果可知,玻纤长度

因相互作用断裂的还较少，同时，由Fig.11(b)和

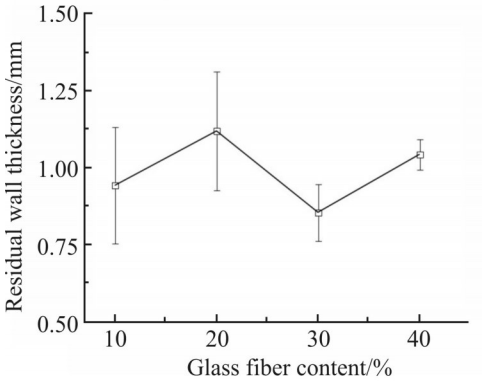


Fig. 14 Residual wall thickness at different glass fiber mass fractions

Fig.11(c)可知，此时模壁层玻纤取向大多与流动方向呈夹角分布，玻纤与玻纤，玻纤与基体之间能更好形成不易破坏的三维交叉结构，从而导致弹头推动熔体时所受到的阻力更大，所以其壁厚增大；当玻纤质量分数由20%增加至30%时，熔体内玻纤密度增大，由Fig.9可知，玻纤长度大部分分布在长度较短区间内，此时玻纤断裂严重，玻纤之间不利于形成稳定的三维结构，且由Fig.12(b)和Fig.12 (c)可知，模壁层和中间层的取向较玻纤含量20%的更好，此时弹头穿透熔体时，其沿流动方向上的垂直剪切力更大，产生的剪切作用更强，弹头穿透所受到的阻力更小，穿透更容易，所以此时壁厚减小；但是，当玻纤质量分数增加到40%时，长玻纤与基体之间的相互作用达到最大，玻纤间的相互干扰程度最大，玻纤断裂加剧，导致其穿透阻力增大，故而管件的壁厚增大。

2.4 玻纤质量分数对W-PAIM管件耐压性能的影响

不同玻纤质量分数的W-PAIM管件其力学性能也不尽相同，管件的耐压性是衡量制件质量的重要因素之一。分别对玻纤质量分数为10%，20%，30%和40%的长玻纤增强聚丙烯W-PAIM制件进行耐压测试，以管件瞬时爆破的最大压力值作为衡量管件的耐压性，其测试结果如Fig.15所示。

由Fig.15可知，LGFRPP复合材料W-PAIM管件的耐压强度随着玻纤质量分数的增加先增强后降低最后又增强。当玻纤质量分数为20%时，管件的耐压性能最好，其瞬时爆破达到的最大水压为5.24 MPa，其变化趋势与玻纤质量分数对W-PAIM管件壁厚变化趋势一致，如Fig.9所示，由此可见，管件的壁厚与耐压性能之间存在一定关联。

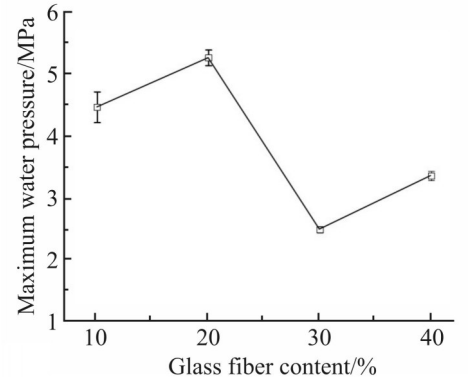


Fig. 15 Effect of glass fiber mass fraction on the pressure resistance of long glass fiber reinforced polypropylene W-PAIM pipe fittings

这是由于玻纤质量分数与玻纤保留长度共同决定W-PAIM管件的耐压性能[23]。当玻纤质量分数为10%~20%时，玻纤在制品中的分布密度低且均匀，熔体的流动性好，玻纤长度因玻纤相互作用而断裂得少，此时玻纤质量分数对管件的耐压性能增强起主要作用，所以随着玻纤质量分数的增加其耐压性能也随之增强；当玻纤质量分数为20%时，由Fig.11(b)和由Fig.11 (c)可知，此时模壁层和中间层的玻纤分布基本上都是与流动方向呈夹角分布，玻纤与玻纤、玻纤与基体之间形成的三维交叉结构更能提高管件的力学性能，所以其耐压性能最好。

但当玻纤质量分数增加到30%时，随着熔体内玻纤密度的增大，玻纤与基体、玻纤与玻纤、以及玻纤与模壁层之间的相互作用增强，由其所产生的强剪切作用相应增加，导致玻纤断裂严重且纤维在制品中更容易产生团聚效应[24]。同时，由Fig.13(b) 和Fig.13(c)可知，此时模壁层和中间层的玻纤沿流动方向取向变好，不利于其抵抗环向涨开力，此时玻纤长度起着决定性作用，所以此时耐压性能随着玻纤含量的增加而降低。

当玻纤质量分数增加到40%时，虽然此时玻纤断裂严重，长度降低，但是其壁厚增大，在玻纤质量分数与壁厚的双重影响下，管件的耐压性又逐渐提升。

由此可见，玻纤质量分数过高对管件的耐压性能提高起阻碍作用，当玻纤质量分数为20%时，LGFRPP管件的耐压性能最好。

3　结论

本文研究了玻纤质量分数对W-PAIM管件玻纤断裂长度、纤维取向、壁厚、以及耐压强度的影响,通过对实验结果的分析,得出以下结论。

(1)玻纤长度随着玻纤质量分数的增加在长度较短的区间中占比较大,在较长的区间占比较小;当玻纤含量大于20%时,玻纤受到的剪切加剧,玻纤断裂严重。

(2)不同玻纤质量分数的LGFRPP成型的W-PAIM管件壁厚层分为模壁层、中间层和水道层3层。水道层的玻纤取向较模壁层和中间层的取向更好,随着玻纤质量分数的增加,玻纤沿流动方向的取向变差,玻纤质量分数为20%时,中间层的玻纤取向最差,玻纤质量分数为30%时,模壁层的玻纤取向变好。

(3)W-PAIM管件的壁厚随着玻纤质量分数的增加先增大后减小后又继续增大。

(4)耐压强度随着玻纤质量分数的增加先增大后减小最后再增大,当玻纤质量分数为20%时,W-PAIM管件耐压性能最好。

参考文献:

[1] 黄丽. 聚合物复合材料[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2012.

[2] 仇永宏. 长玻纤增强聚丙烯复合材料结构与性能[J]. 石化技术, 2022, 29(6): 1-3.
Qiu Y H. Structure and properties of long glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. Petrochemical Technology, 2022, 29 (6): 1-3.

[3] Du B, Li Z X, Bai H M, *et al.* Mechanical property of long glass fiber reinforced poly-propylene composite: from material to car-seat frame and bumper beam[J]. Polymers, 2022, 14: 1814.

[4] Chen T, Mansfield D C, Ju L, *et al*. The influence of mechanical recycling on the properties of thermotropic liquid crystalline polymer and long glass fiber reinforced polypropylene[J]. Composites Part B: Engineering,2020,200: 108316.

[5] 刘创彬, 叶树林, 李伟. 长玻纤增强热塑性复合材料的研究进展[J]. 广州化工, 2020, 48(24): 4-6.
Liu C B, Ye S L, Li W. Study on forming process and mechanical properties of long glass fiber reinforced thermoplastic composites [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(24): 4-6.

[6] Rohde M, Ebel A, Wolff-fabrs F, *et al.* Influence of processing parameters on the fiber length and impact properties of injection molded long glass fiber reinforced polypropylene[J]. International Polymer Processing, 2011, 26: 292-303.

[7] Wang J C, Geng C Z, Luo F, *et al*. Shear induced fiber orientation, fiber breakage and matrix molecular orientation in long glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. Materials Science & Engineering: A, 2011, 528: 3169-3176.

[8] You B S, Zhang K Z, Guo J B, *et al*. Morphology, dynamic mechanical and mechanical properties of long glass fiber reinforced polypropylene and polyvinyl chloride composites[J]. Advanced Materials Research, 2013, 750-752: 107-110.

[9] 熊爱华, 柳和生, 黄益宾, 等. 长玻纤增强聚合物注塑充填行为和纤维取向模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(10): 110-114.
Xiong A H, Liu H S, Huang Y B, *et al*. Simulation of injection filling behavior and fiber orientation of long glass fiber reinforced polymer[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2015, 31 (10): 110-114.

[10] Foss P H, Tseng H C, Snawerdt J, *et al*. Prediction of fiber orientation distribution in injection molded parts using Moldex3D simulation[J]. Polymer Composites, 2014, 35: 671-680.

[11] Tseng H C, Chang R Y, Hsu C H. Numerical prediction of fiber orientation and mechanical performance for short/long glass and carbon fiber-reinforced composites[J]. Composites Science and Technology, 2017, 144: 51-56.

[12] Tangqing K, Qiang F, Tian L, *et al*. Numerical simulation on the penetration behavior of the projectile during the water injection stage of water-projectile-assisted injection molding process[J]. Advances in Polymer Technology, 2020, 2020: 6861216.

[13] Bad H. Projectile injection technology for improved moulding of hollow articles/high savings possible/SPE award[EB/OL]. http://www.plasteurope.com/news/R_CHLING_t206079.

[14] Hopmann C, Recht U. Manufacturing of fiber-reinforced,

elastomeric parts using the injection molding process[C]. Orlando, FL: Proceedings of the Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers 2015, (ANTEC 2015), 2015: 1728-1732.

[15] Hopmann C, Michaeli W, Gründler M, *et al.* Process development of the projectile injection technique (PIT) [C]. Boston, MA: Proceedings of the Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers 2011, (ANTEC 2011), 2011: 1706-1710.

[16] 匡唐清, 潘俊宇, 刘文文, 等. 水驱动弹头辅助注塑管件残余壁厚的形成与工艺参数影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(4): 108-114.

Kuang T Q, Pan J Y, Liu W W, *et al*. Formation of residual wall thickness of water-driven bullet-aided injection molded pipe by overflow method and influence of process parameters[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(4): 108-114.

[17] 钟罗浩, 匡唐清, 赖家美, 等. 成型工艺对短玻璃纤维增强聚丙烯注塑管件的壁厚分布及玻璃纤维取向的影响[J]. 中国塑料, 2021, 35(5): 11-16.

Zhong L H, Kuang T Q, Lai J M, *et al*. Effect of molding process on wall residual thickness distribution and glass-fiber orientation of short-glass-fiber reinforced polypropylene molded pipes[J]. China Plastics, 2021, 35(5): 11-16.

[18] Kuang T Q, Pan J Y, Feng Q, *et al.* Residual wall thickness of water-powered projectile-assisted injection molding pipes[J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59: 295-303.

[19] Yu Z, Liu H S, Kuang T Q, *et al.* Numerical simulation during short-shot water-assisted injection molding based on the overflow cavity for short-glass fiber-reinforced polypropylene [J]. Advances in Polymer Technology, 2020, 2020: 1-13.

[20] 孔虎子. 水辅成型PP制品注射工艺及性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

Kong H Z. Experimental study on injection process and performance of water assisted PP products[D]. Gangzhou: Zhejiang University, 2013.

[21] 丁加新, 陈英龙, 周华. 水辅成型浮动芯注射对制品残余壁厚的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2017, 51(5): 937-945.

Ding J X, Chen Y L, Zhou H. Effect on residual wall thickness of parts with floating core injection of water-assisted injection molding[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2017, 51(5): 937-945.

[22] 周长汶, 咸家玉, 王培毅, 等. 短切纤维不同短切长度在热塑性复合材料中应用研究[J]. 玻璃纤维, 2022(3):30-33.

Zhou C W, Xian J Y, Wang P Y, *et al*. Research on the performances of chopped strands in different length in thermoplastic composites[J]. Glass Fiber, 2022(3): 30-33.

[23] 匡唐清, 朱瑶瑶, 柳和生, 等. 玻纤质量分数对短玻纤增强聚丙烯水辅助共注塑管件的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(10): 4551-4560.

Kuang T Q, Zhu Y Y, Liu H S, *et al*. Effect of glass fiber mass fraction on the water assisted co-injection molding pipes of short glass fiber reinforced polypropylene[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(10): 4551-4560.

[24] 刘琳, 黄诚珑. 长玻纤增强聚丙烯复合材料的制备及力学性能[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(3): 42-46.

Liu L, Huang C L. Preparation and mechanical properties of long glass fiber reinforced polypropylene composite[J]. Engineering Plastics Application, 2021,49(3):42-46.

Effect of Glass Fiber Mass Fraction on the Water-Projectile Assisted Injection Molding Pipes of Long Glass Fiber Reinforced Polypropylene

Tangqing Kuang[1], Sanzhe Feng[1], Yaoyao Zhu[1], Hesheng Liu[1], Fan Yang[2]
(*1.School of Mechanical & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Center for Basic Experiments and Engineering Practice, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China*)

ABSTRACT: A series of water-projectile assisted injection-molding pipes (W-PAIM)were made from long glass fiber reinforced polypropylene (LGFRPP) materials with glass fiber mass fractions of 10%, 20%, 30%, and 40%. The effect of glass fiber mass fraction on glass fiber fracture length, fiber orientation, wall thickness, and pressure resistance was explored. The results show that, the percentage of glass fiber fracture length decreases in the longer interval with the increases of glass fiber mass fraction. W-PAIM parts with different glass fiber mass fractions show diverse orientation in the wall thickness layer, the glass fiber in the water channel layer are better oriented along the flow direction than the mold wall layer and intermediate layer, when the glass fiber mass fraction is 10% and 40%, the best orientation of glass fiber in the water channel layer is, the worst orientation of the intermediate layer is observed at a glass fiber mass fraction of 20%, and the better orientation of the glass fiber in the mold wall layer at a glass fiber mass fraction of 30%. With the increase of glass fiber mass fraction, the wall thickness of W-PAIM fittings tends to increase first and decrease follows, then increase at last. With the growth of glass fiber content, the pressure resistance of the fittings first increases, then drops and finally rises again, when the glass fiber mass fraction is 20%, the best pressure resistance is achieved.

Keywords: long glass fiber reinforced polypropylene; water-projectile assisted injection molding; mass fraction of glass fiber; glass fiber length; fiber orientation; wall thickness; pressure resistance